

УДК 536.24

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПАРООБРАЗОВАНИИ ХЛАДАГЕНТОВ R404A, R407C И R410A НА ТЕХНИЧЕСКИ ГЛАДКИХ ТЕПЛООТДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

**А. В. ОВСЯННИК, Е. Н. ВОЛКОВА, Т. С. ЮФАНОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### Введение

Вследствие сложной природы процесса пузырькового кипения, его зависимости от неподдающихся учету поверхностных факторов пока не создано достаточно полной теории процесса кипения, учитывающей все факторы, влияющие на теплоотдачу при пузырьковом кипении. Это приводит к тому, что практические расчеты теплоотдачи при пузырьковом кипении основываются на использовании эмпирических соотношений, большинство из которых получено с применением аппарата теории подобия.

При этом необходимо отметить, что в настоящее время не существует единого общепринятого математического описания данного процесса и, как следствие, не существует единой системы чисел подобия, которая используется при обработке опытных данных.

Основываясь на той или иной физической модели процесса, авторы применяют различные исходные математические описания процесса, на основе которых получают свою систему чисел подобия.

Целями данной работы являются:

- экспериментальное исследование процесса теплообмена при парообразовании озонобезопасных смесевых хладагентов R404a, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме;
- получение эмпирического соотношения, позволяющего найти коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a для любых заранее заданных исходных условий при исследованных режимных параметрах;
- разработка критериальных уравнений для определения интенсивности теплоотдачи при парообразовании озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях в условиях большого объема на основе результатов экспериментального исследования процесса теплообмена.

### Анализ экспериментальных исследований

Вопрос о закономерностях процесса и о расчетном определении интенсивности теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей достаточно сложен. Точное решение этой задачи пока не получено. Трудным оказывается также получение приближенного решения, имеющего ясный физический смысл и удовлетворительно обобщающего опытные данные.

Для описания теплоотдачи при кипении необходимо в систему уравнений включить условия, отражающие специфику данного вида теплообмена. Процесс кипения

определяется следующими условиями и соответствующими им заранее заданными величинами: физическими свойствами жидкости и ее пара, зависящими от рода жидкости и давления, и, в общем случае, свойствами поверхности нагрева. Кроме того, необходимо задать температуру стенки  $T_{ст}$ , т. е. температурный напор  $\Delta T$  (условие первого рода), либо плотность теплового потока на стенке  $q$  (условия второго рода). Оба способа по существу равнозначны, но от выбора задания ( $\Delta T$  или  $q$ ) будет зависеть форма и комбинация определяющих чисел. Наиболее часто для практических расчетов и обобщения экспериментальных данных используется второй способ – задание тепловой нагрузки поверхности нагрева.

При такой постановке задачи изначально заданными можно считать плотность теплового потока  $q$ , а также физические свойства жидкости (при заданном давлении насыщения). В этом случае отношение  $q/rp_{н}$  имеет размерность скорости и имеет строго заданное значение, в отличие от скорости движения жидкости, которая представляет собой довольно сложную функцию этого отношения и других величин. Величина  $q/rp_{н}$  является специфическим параметром для теплообмена при кипении, поэтому ее необходимо включать в условия однозначности.

Одним из основных вопросов, возникающих при определении критериев подобия, является вопрос о выборе характерного линейного размера. Таким размером не может быть линейный размер поверхности нагрева, поскольку обычно рассматривается задача кипения на поверхности больших размеров, значительно превышающей размер паровых пузырей. Отсутствие существенного влияния высоты слоя жидкости на интенсивность теплообмена при кипении также доказана в ряде экспериментальных работ. Критический радиус зародыша  $R_{кр}$  зависит от температурного напора (или от плотности теплового потока) и также, следовательно, не может быть принят как характерный линейный размер [1].

В общем случае, анализ системы уравнений процесса теплообмена при кипении в большом объеме приводит к связям между обобщенными переменными. С. С. Кутателадзе и соавторы [2] предложили следующее критериальное уравнение для обобщения опытных данных:

$$Nu = f(Re, Pr, Ar, K_t, K_p). \quad (1)$$

Из приведенных переменных величин, стоящих под знаком функции, необходимо выделить те, которые в большей степени влияют на процесс теплоотдачи в исследованных условиях, и исключить из числа аргументов те переменные, которые незначительно влияют на теплоотдачу при кипении. Кроме того, из числа аргументов исключаются величины, которые являются постоянными в исследованных условиях [1].

Установлено, что на интенсивность теплоотдачи наибольшее влияние оказывают плотность теплового потока  $q$  и давление (температура) насыщения  $p$ . Влияние величин  $q$  и  $p$  определяется числом Рейнольдса кипения  $Re$  и числом  $K_p$ . При реализации условий беспрепятственного отвода паровой фазы из области кипения теплоотдача при пузырьковом кипении не зависит от формы и ориентации теплоотдающей поверхности, следовательно, ускорение сил поля тяжести не оказывает заметного влияния на теплоотдачу и число Архимеда кипения можно исключить из числа аргументов [3]. Таким образом, критериальные зависимости, описывающие теплоотдачу при кипении фреонов R407c, R404a и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности, могут быть записаны в виде [2]:

$$Nu = f(Re, Pr, K_p). \quad (2)$$

Уравнение для определения коэффициента теплоотдачи в критериальном виде тогда запишется:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot K_p^k \cdot Pr^l. \quad (3)$$

Здесь

$$Nu = \frac{\alpha l_*}{\lambda_{ж}}; \quad Re = \frac{q}{r \rho_{п} a} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}}; \quad K_p = \frac{p_{п}}{\sqrt{\sigma g(\rho_{ж} - \rho_{г})}}.$$

Теплофизические свойства жидкости и пара принимаются при температуре насыщения и представлены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические свойства хладагентов R407с, R404а и R410а

Теплофизические свойства	R407с	R404а	R410а
Плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup>	1138	1048	1061
Плотность насыщенных паров, кг/м <sup>3</sup>	41,57	62,52	61,64
Удельная массовая теплоемкость жидкости, кДж/кг · К	1,533	1,502	1,692
Удельная массовая теплоемкость паров, кДж/кг · К	1,107	0,871	1,346
Коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м · К	0,085	0,0746	0,087
Коэффициент теплопроводности паров, Вт/м · К	0,0154	0,012	0,0165
Коэффициент температуропроводности, м <sup>2</sup> /с	$0,487 \cdot 10^{-7}$	$0,47 \cdot 10^{-7}$	$0,485 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент кинематической вязкости, м <sup>2</sup> /с	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-7}$	$0,115 \cdot 10^{-7}$
Поверхностное натяжение, Н/м	0,6352	0,5413	0,6495
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	191,1	198,7	186,4

В результате обобщения опытных данных было получено критериальное уравнение вида

$$Nu = 3,0 \cdot Re^{0,5} \cdot K_p^{0,24} \cdot Pr^{-0,8}. \quad (4)$$

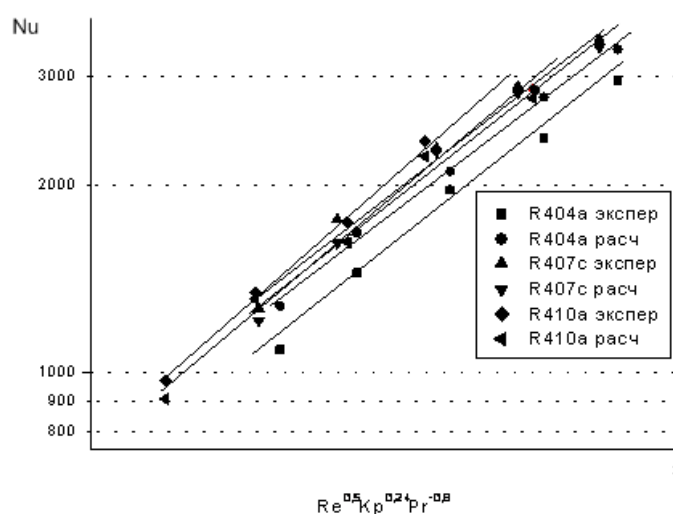


Рис. 1. Экспериментальные характеристики, установленные при исследовании теплообмена при кипении хладагентов R407с, R404а и R410а на гладких поверхностях, и данные, рассчитанные по предложенному критериальному уравнению (4)

Таким образом, полученное критериальное уравнение позволяет рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении фреонов R407c, R404a и R410a в условиях большого объема. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются полученным критериальным уравнением с погрешностью  $\pm 20\%$ , и эта зависимость может быть рекомендована для инженерных расчетов интенсивности теплоотдачи при кипении R407c, R404a и R410a в условиях большого объема на гладких технически шероховатых поверхностях.

Коэффициент теплоотдачи при кипении является функцией многих аргументов. Поэтому наряду с приближенными выражениями функции, имеющими достаточное физическое обоснование, возможен ряд вариантов выражения этой функции, по существу слабо отражающих физику процесса, но более или менее удовлетворительно соответствующих опытным данным для некоторых жидкостей, интервалов давлений, тепловых нагрузок и т. п. Этим объясняется наличие недостаточно обоснованных критериальных систем и формул, которые базируются на использовании аналогий, термодинамического подобия и т. п. и получены в результате формальных математических операций или путем случайного выбора критериев.

Отсутствие достаточно удовлетворительных обобщенных формул делает необходимым крайне осторожный подход к вычислению коэффициентов теплоотдачи для различных жидкостей. В общем виде коэффициент теплоотдачи при кипении находится по выражению [4]:

$$\alpha = C \varphi p^A q^B, \quad (5)$$

где  $C$  – множитель, зависящий от свойств жидкости и поверхности нагрева;  $\varphi$  – множитель для перехода к другим жидкостям;  $p$  – абсолютное давление, кгс/см<sup>2</sup>;  $A$ ,  $B$  – показатели степеней, зависящие от свойств жидкости;  $q$  – тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup> · ч.

В результате обобщения полученных результатов при кипении хладагентов на гладких трубах удалось получить общую эмпирическую зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи для хладагентов R404a, R407c и R410a [4]:

$$\alpha = 4,4 p^{0,4} q^{0,7}. \quad (6)$$

Для более точного определения коэффициента теплоотдачи вводится эмпирический коэффициент  $\varphi$ .

Коэффициенты  $\varphi$  для исследованных хладагентов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение эмпирического коэффициента в уравнении (6)

Марка хладагента	$\varphi$
R404a	1,77
R407c	1,46
R410a	1,85

На рис. 2–4 приведены экспериментальные характеристики, установленные при исследовании процесса теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на гладких шероховатых поверхностях, и данные, рассчитанные по зависимости (6).

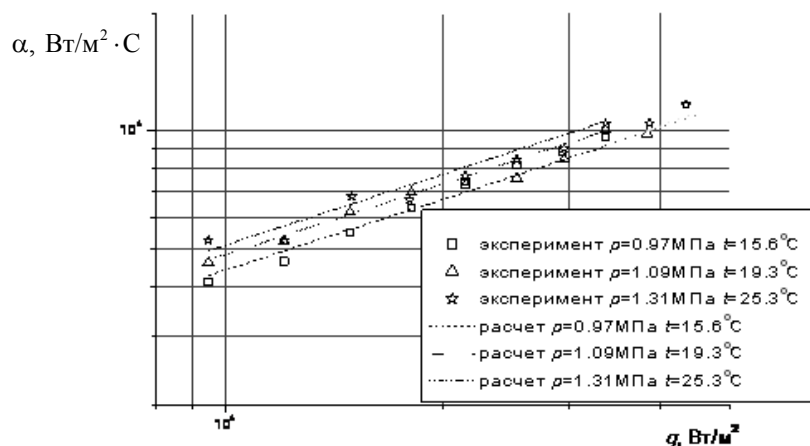


Рис. 2. Экспериментальные характеристики, установленные при исследовании процесса теплообмена при кипении R404a на гладких шероховатых поверхностях, и данные, рассчитанные по зависимости (6)

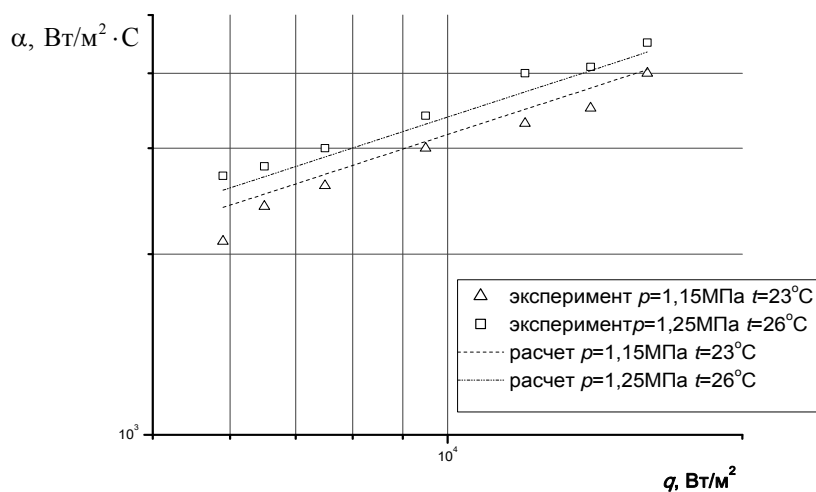


Рис. 3. Экспериментальные характеристики, установленные при исследовании процесса теплообмена при кипении R407c на гладких шероховатых поверхностях, и данные, рассчитанные по зависимости (6)

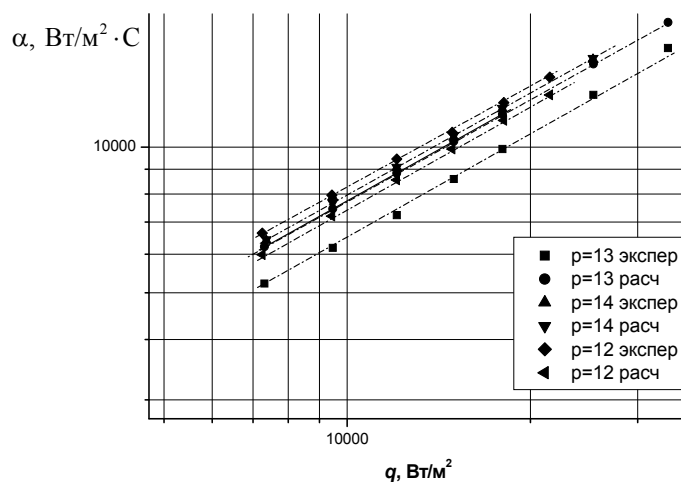


Рис. 4. Экспериментальные характеристики, установленные при исследовании теплообмена при кипении R410a на гладких шероховатых поверхностях, и данные, рассчитанные по предложенной эмпирической зависимости (6)

На графиках заметно расхождение между расчетными и опытными данными, однако отклонение составляет не более 12 % для R404a, не более 8 % для R407c и не более 16 % для R410a, что позволяет использовать формулу (6) с предложенными коэффициентами  $C$  в технических расчетах.

### **Заключение**

В результате обобщения полученных результатов при кипении хладагентов на гладких трубах установлено эмпирическое соотношение в размерном виде, позволяющее рассчитать коэффициент теплоотдачи при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a, а также получено критериальное уравнение в диапазоне подводимых тепловых потоков 3,7–48,8 кВт/м<sup>2</sup> и давлений насыщения в пределах 0,9–1,4 МПа в условиях большого объема. Экспериментальные данные удовлетворительно описываются полученными эмпирическим и критериальным уравнениями с погрешностью  $\pm 20$  %. Полученные соотношения можно рекомендовать для инженерных расчетов интенсивности теплообмена при кипении озонобезопасных хладагентов в условиях большого объема на гладких технически шероховатых поверхностях испарителей современных холодильных машин и теплонасосных установок.

### **Литература**

1. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высш. шк., 1977.
2. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. – 415 с.
3. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
4. Исследование тепло- и массопереноса при фазовых превращениях однокомпонентных и смесевых озонобезопасных хладагентов на гладких и развитых теплоотдающих поверхностях промышленных теплообменных аппаратов : отчет о НИР (заключ.) / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; рук. темы А. В. Овсянник. – Гомель, 2013. – 216 с. – № ГР 20110737.

*Получено 16.06.2014 г.*